

GPS を用いた陸上競技者リアルタイム計測システムの開発

Development of a GPS-based real time measurement system for athletes

○ 長嶋拓哉, 高橋隆行

○ Takuya Nagashima, Takayuki Takahashi

福島大学

Fukushima University

キーワード: GPS (Global Positioning System), D-GPS (Differential GPS)

連絡先: 〒 960-1296 福島県福島市金谷川 1 福島大学 理工学群共生システム理工学類 高橋研究室
長嶋拓哉, Tel.: (024)548-5259, Fax.: (024)548-5259, E-mail: naga@rb.sss.fukushima-u.ac.jp

1. はじめに

陸上競技者へのコーチング内容は, 近年のスポーツ科学の発展にも関わらずコーチの経験則や感性に基づいて指導にあたっていることが多い. そのため, コーチと選手との感覚の相違が生じたり, また, このような経験則や感性に基づいたトレーニングや指導は最善であるという確証性も低く, これらの感覚的なものを定量的に表し, 評価することが必要だと考えられる.

この課題に対して筆者らは GPS を用いた陸上競技者リアルタイム計測システムの実現を目指している. 本システムでは GPS モジュールと加速度センサを組み込んだユニットを競技者に装着し, GPS 測位により競技者の位置を正確に計測する. 計測されたデータのうち GPS モジュールから得られる競技者の位置情報と, 加速度センサから得られるピッチ情報を同期させることで走行速度やストライドなども同時に計測できるシステムを目標としている. このシステムを使用して競技者の走りの情報を数値化す

ることにより, コーチや選手は定量的なデータを基に効率的な指導やトレーニングを行うことができるかと期待できる.

陸上競技者を計測するシステムとして, 他にもカメラによる画像処理を用いる方法¹⁾や, レーザー測定器を用いる方法²⁾などがある. これらの方法は, 陸上競技者に対して計測装置を装着しなくても計測できるという利点がある. しかし, 計測装置をトラックに設置する必要があるため, 汎用性が低いという問題点がある. それに対して, 筆者らが提案するシステムは競技者に直接計測装置を装着することにより, GPS 衛星からの電波が受信できるエリアならどこでも計測できるという汎用性の高さと, 高精度な測位方法を用いることにより画像処理やレーザー測定器を用いる方法と同等の精度が出せるといった利点が挙げられる. また, GPS モジュールを用いた計測システムには競争馬用の計測システム EquiPILOT³⁾がある. この EquiPILOT は GPS モジュールで馬の走行速度を計測し, さら

に心拍数も記録することで競争馬の能力の指標となる $VHR_{\max}$ を求める装置になっている。

本論文では、システムのベースとなる GPS の測位方法と GPS モジュールの測位精度検証実験について報告する。次章以降では、2 章で GPS の測位原理、3 章で GPS 測位実験、4 章にまとめと今後の課題を述べる。

2. GPS の原理

2.1 測定値⁴⁾

一般的な GPS 受信機で得られる測位信号の測定値は疑似距離 (Pseudo range) と呼ばれる。疑似距離は GPS 衛星から送信された測位信号中の PRN(Pseudo-Random Noise) コードを利用する。

衛星はそれぞれ固有の PRN コードを持っている。一見するとランダム雑音のようなパターンである。このためタイミングをずらして PRN コードの自己相関をとると相関値は 0 になる。同様に異なる衛星の PRN コードの相互相関をとると相関値は 0 になる。同じ PRN コードでタイミングにずれがない場合のみ相関値は 1 をとる。この性質を利用し、受信機では受信した信号に PRN コードの相関をとる事により、発信衛星と、タイミングのずれを検出し、相関値がピークになるようにタイミングを調整する。送受信機間のタイミングが一致すれば時間差が算出可能なので、送受信機間の疑似距離を測定できる。疑似距離の観測モデル P は次式で示される。

$$P = c(t_r - t^s) + \varepsilon_P = \rho + c(dt - dT) + I + T + \varepsilon_P \quad (1)$$

各パラメータを Table 1 に示す。

また、精密測位を目的とする場合では疑似距離に加えて搬送波位相 (Carrier Phase) を観測量として計測する。搬送波位相とは受信機で復調した測距信号の搬送波の位相角を連続的に測定したものである。搬送波位相には疑似距離と

Table 1 Meaning of symbols on Pseudo range

Symbol	Meaning
c	Light speed
t_r	Receipt time
t^s	Sending time
ρ	Geometry distance
dt	Receiver clock error
dT	Satellite clock error
I	Ionospheric delay
T	Tropospheric delay
ε_P	Pseudo range observation error

同様に衛星と観測点間の距離情報が含まれている。疑似距離と比較して高精度な測定が可能のため精密測位に使用される。搬送波位相の観測モデル L は次式で示される。

$$L = \lambda\Phi = \rho + c(dt - dT) - I + T + \lambda N + \varepsilon_L \quad (2)$$

また、搬送波位相バイアス N は次式で示される。

$$N = \phi_{0r} - \phi_0^s + n \quad (3)$$

各パラメータを Table 2 に示す。

Table 2 Meaning of symbols on Carrier phase

Symbol	Meaning
c	Light speed
ρ	Geometry distance
dt	Receiver clock error
dT	Satellite clock error
I	Ionospheric delay
T	Tropospheric delay
ε_L	Carrier phase observation error
λ	Carrier wave length
N	Carrier phase bias
ϕ_{0r}	Receiver initial phase
ϕ_0^s	Satellite initial phase
n	Integer ambiguity

2.2 単独測位⁵⁾

単独測位は最も一般的な測位法であり、疑似距離を基本観測量として推定を行う。以下で単独測位の手法を説明する。

衛星 i と受信機間の疑似距離を r_i とする．疑似距離は幾何学距離 ρ_i に受信機の時計進み δ による誤差が加わって計測されるため，これらの関係は

$$r_i = \rho_i + c\delta = \rho_i + s \quad (4)$$

となる．ここで $s = c\delta$ は，時計誤差と呼ばれる．例えば受信機の時計が進んでいる場合，測距信号が到着する瞬間に本来よりも進んだ時刻が観測されるため，距離の測定結果が長くなる．

衛星の位置を既知として疑似距離が計測されたときの受信機位置を求めることを考える．衛星 i と受信機間の正確な距離 ρ_i は，受信機位置を x, y, z ，衛星 i の位置を x_i, y_i, z_i とすると

$$\rho_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} \quad (5)$$

と示される．疑似距離は式 (4) で表されるため，連立方程式

$$\begin{cases} r_1 = \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} + s \\ r_2 = \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2} + s \\ \vdots \\ r_N = \sqrt{(x_N - x)^2 + (y_N - y)^2 + (z_N - z)^2} + s \end{cases} \quad (6)$$

を， x, y, z, s について解けばよい．決定する際は，3 つの位置情報に加え受信機の時計誤差 s を含む最低 4 つの未知数が存在するため，4 機以上の衛星を用いて疑似距離を算出する必要がある．

式 (6) は二乗すると球面を表す式になり，幾何学的に，受信機位置 x, y, z はこれらの球面の交点として求めることができる．正しく距離が計測されていれば 4 つの球面は 1 点で交わるが，疑似距離は時計誤差 $s = c\delta$ だけ長く計測されるため，通常 1 点では交わらない．このため，Fig. 1 のように球面が 1 点に交わるように s を変化させて球面の大きさを調整することで，受信機位置が求められる．式 (6) は非線形の連立方程式であるため，適当な初期値のまわりで線形化を行い，例えばニュートン・ラフソン法により解を得ることができる．

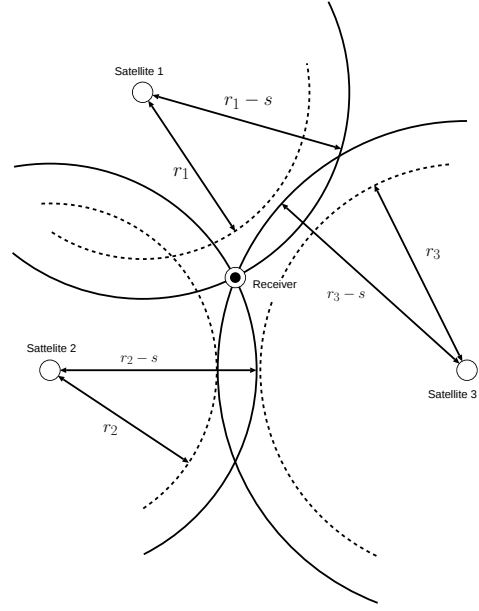


Fig. 1 Single point positioning

2.3 D-GPS⁵⁾

GPS の測位誤差要因は，衛星から放送される軌道情報の誤差などを含む GPS システムに依存する誤差，電離層遅延や対流圏遅延などを含む大気圏伝搬に起因する誤差，衛星の幾何学的配置による誤差などが挙げられ，これらの誤差は，同一時刻に同一衛星からの信号で測位を行った場合，受信機を設置する場所に依存せず共通に現れる．これを利用すると，固定された GPS 受信機を基準局として誤差を計測し，この誤差情報を別地点の GPS 受信機に与えることにより誤差を補正することができる．この測位方式を D-GPS(Differential GPS) という．

基準局で観測される衛星 i までの疑似距離 r_i^0 は，真の距離 ρ_i^0 と次のような関係がある．

$$r_i^0 = \rho_i^0 + \delta_i + \Delta^0 + v_i^0 \quad (7)$$

ここで δ_i は衛星 i に起因する誤差， Δ^0 は基準局のアンテナ位置に依存する誤差， v_i^0 は観測ごとに生じるランダム誤差である．基準局の位置は既知であるため，真の距離 ρ_i^0 は計算により求められる．したがって，

$$r_i^0 - \rho_i^0 = \delta_i + \Delta^0 + v_i^0 \quad (8)$$

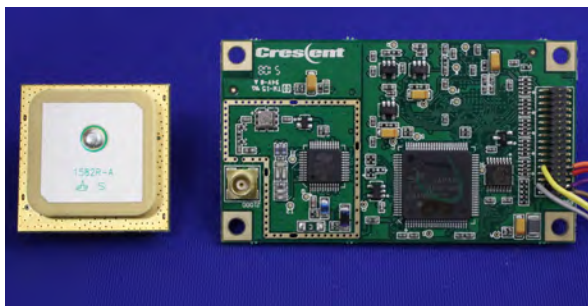


Fig. 2 Left:EB-85A Right:Crescent OEM Board

のように誤差成分だけを取り出すことができる．
移動局でも同様に

$$r_i^1 = \rho_i^1 + \delta_i + \Delta^1 + v_i^1 \quad (9)$$

と疑似距離が観測される．基準局で観測された誤差情報を移動局に伝送し，移動局で観測される疑似距離から，基準局の誤差成分 ($r_i^0 - \rho_i^0$) を差し引くと，

$$\begin{aligned} r_i^1 - (r_i^0 - \rho_i^0) &= \rho_i^1 + \delta_i + \Delta^1 - (\delta_i + \Delta^0 + v_i^0) \\ &= \rho_i^1 + (\Delta^1 - \Delta^0) + (v_i^1 - v_i^0) \end{aligned} \quad (10)$$

となり， δ_i の項がキャンセルされるので，衛星に起因する誤差が除去される．以上が DGPS の基本原理である．

3. GPS 測位実験

3.1 GPS モジュールについて

実験では Fig. 2 に示す，EB-85A (ETEK NAVIGATION, INC.) と Crescent OEM Board (Hemisphere) を用いて測位実験を行った．それぞれのモジュールの寸法や重量，測位精度などの情報を Table 3 に示す．Crescent OEM Board に関しては，標準でアンテナを搭載していないため，別途 NVP-N20 (SANYO) という GPS アンテナを接続することで実験を行った．

3.2 目標性能

測定対象となる陸上競技者の走行ピッチはおおよそ 4[step/s]，ストライドはおおよそ 2[m] であ

る．陸上競技の指導者との協議の結果，それらをおおよそ % の精度で計測できることを当面の目標とした．その結果，計測周波数が 5～10[Hz] 程度，位置測定精度は 10[cm] 未満とした．

一方，目標とする計測システムでは，GPS モジュールを競技者の体に装着しなければならないため，その大きさや質量が問題となる．また，本システムは，主として短距離競技での計測を目指しているため，カタログには現れない短時間 (おおよそ 60[s] 程度) での測定精度や安定性などが重要である．

本研究では，市販されている GPS モジュールの中から，価格や大きさ，重量，入手性などの点から上記二つのモジュールをまずは検討対象に選んだ．例えば，EB-85A は単独測位での測定精度がカタログスペックでは 3.3[m] であり，それ自体は目標性能から大きくはずれているが，仮に 60[s] 間での短時間での安定性が十分であれば，本システムには利用可能となる．

このような観点を含め，各モジュールの測位精度の検証を行う．

3.3 定点測位実験

3.3.1 実験目的

定点で GPS 測位を行ったときの観測値のばらつきや，観測値の変化の仕方，各モジュールの測位精度の検証を行う．

3.3.2 実験方法

定点測位実験では，

- 1) 更新レートは 5Hz 出力に設定する
- 2) アンテナ上空，アンテナ周囲ともに電波を遮るものが少ない場所で観測する
- 3) ノート PC のターミナルソフトで 5 分間で 1500 データ分の緯度経度情報を取得する
- 4) EB-85A では単独測位で測位する

Table 3 Performance comparative table

Module	EB-85A	Crescent OEM Board
Dimension L×W×H[mm]	30×30×8.6	71.1×40.6×12
Weight [g]	15	20
Maximum update rate [Hz]	5	10
Antenna	Patch antenna	MCX connector
Position accuracy [m]	Single:3.3(CEP)	Single:2.5(2dRMS), D-GPS:0.6(2dRMS),RTK:0.02(2dRMS)

5) Crescent OEM Board では D-GPS で測位する

という条件で実験を行い，取得したデータをグラフ化した．

3.3.3 実験結果

定点測位実験の結果のグラフを以下に示す．このときの両実験とも，測位衛星の数は約 8 機であった．GPS モジュールの正確な絶対位置は不明なため観測データの平均値を真値として扱いグラフ化した．Fig.3 は GPS モジュールから出力される世界測地系での緯度経度を平面座標系に変換し，真値からの観測値のばらつきをグラフ化したものである．Fig.4 は Fig.3 での Crescent OEM Board の観測値グラフを拡大したものである．

Fig.3 のグラフから EB-85A では平均距離 1.77[m]，標準偏差 0.96[m]，Crescent OEM Board では平均距離 0.126[m] 標準偏差 0.04[m] ということが読み取れる．また，EB-85A での単独測位の観測値からは緯度方向には概ね高い精度で測位できているが，経度方向に誤差が大きくなっている．Crescent OEM Board での DGPS の観測では測定値の 98% 以上が 20[cm] の誤差の範囲内に収まっており，高精度で測位できていることがわかる．さらに，このときの観測値の時間変化のグラフを Fig.5 に示す．

以上の結果から EB-85A，Crescent OEM Board 共に高い精度で測位できているが，モジュール

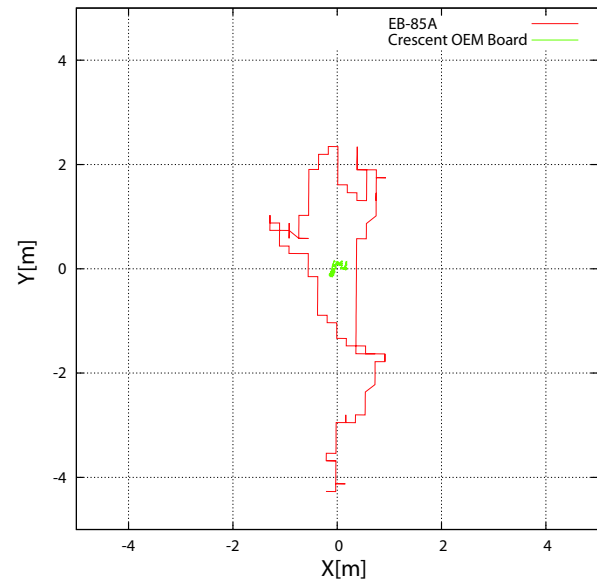


Fig. 3 Fixd-point observation

単独では，位置測定精度 10[cm] 未満という目標性能を満たすことが困難であるといえる．

3.4 移動測位実験

先の実験と同様に二つのモジュールを用いて移動測位の比較実験を行った．

3.4.1 実験目的

移動しながら測位を行った場合の観測値の変化と，各モジュールの測位精度の検証を行う．

3.4.2 実験方法

移動測位実験では，

- 1) 更新レートは 5Hz 出力に設定する

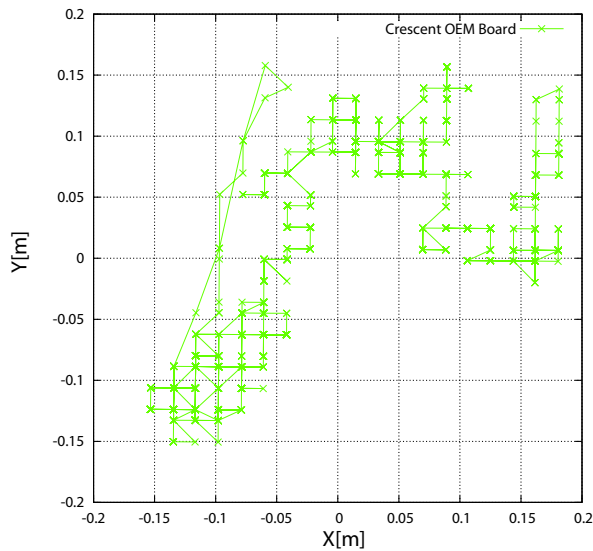


Fig. 4 Crescent OEM Board fixed-point observation

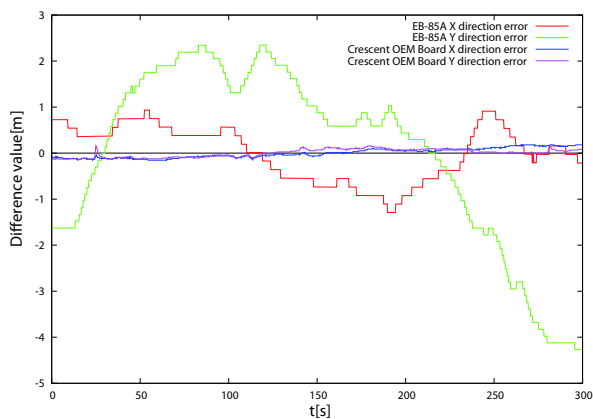


Fig. 5 Time variable

- 2) アンテナ上空，アンテナ周囲ともに電波を遮るものが少ない場所で観測する
- 3) メジャー上を歩いて移動したときの観測値の変化を取得する
- 4) EB-85A では単独測位で測位する
- 5) Crescent OEM Board ではD-GPSで測位する

という条件で実験を行い，取得したデータをグラフ化した．

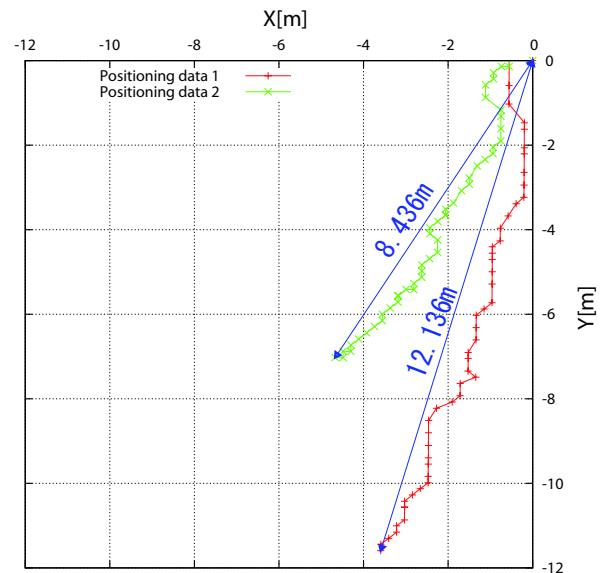


Fig. 6 EB-85A 10m moving observation

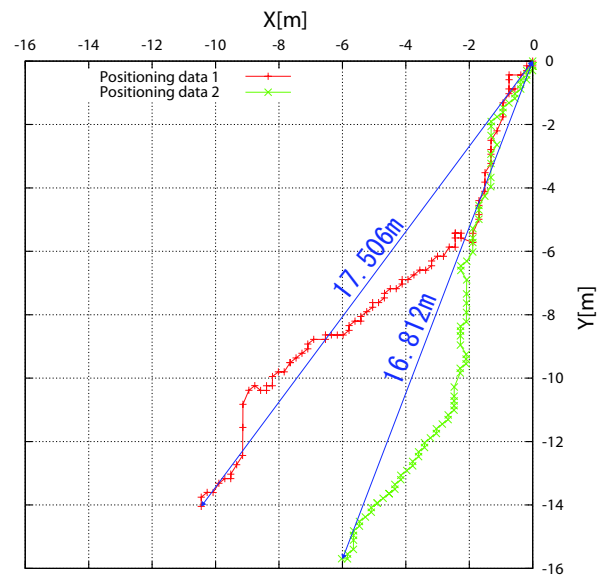


Fig. 7 EB-85A 20m moving observation

3.4.3 実験結果

EB-85A を用いて測位した結果を Fig.6, Fig.7 に，Crescent OEM Board を用いて測位した結果を Fig.8, Fig.9 にそれぞれ示す．

Fig.6, Fig.7 の EB-85A での観測結果から，公称精度内で移動体の測位が可能であるが，目標性能である 10[cm] 未満の精度で競技者の位置を計測することは困難であると考えられる．

Fig.8, Fig.9 の Crescent OEM Board の観測

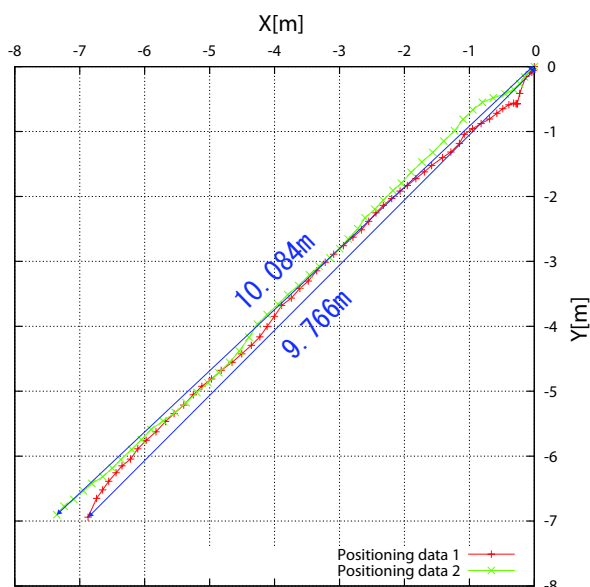


Fig. 8 Crescent OEM Board 10m moving observation

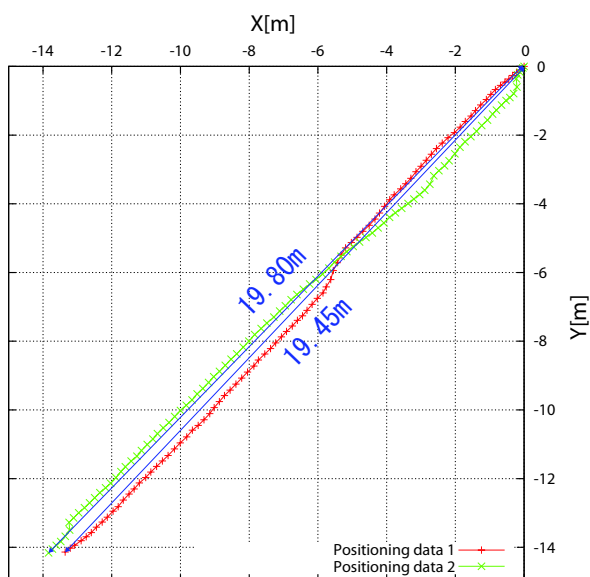


Fig. 9 Crescent OEM Board 20m moving observation

結果を見ると 10[m] 移動実験の 2 本目で 10[cm] 以内での精度で移動体の測位ができているがわかる。しかし、その他 3 本の移動実験では 20[cm] ~ 50[cm] 程度の誤差が発生していることがわかる。EB-85A 程の誤差は見られなかったが、この方法に関しても、現状の測位方法で安定して 10[cm] 未満の精度で測位することは難しいと考えられる。

4. おわりに

本論文では陸上競技者リアルタイム計測システムのベースとなる GPS 測位に関して報告した。10[cm] 未満の精度での計測という目標性能に対して、EB-85A の測位精度では不十分だという結論に至った。Crescent OEM Board での D-GPS では概ね高い精度で測位することができたがやはり安定して目標性能を満たすまでの精度は得られなかった。そこで今後は Crescent OEM Board で、数 cm 単位の測位が可能である搬送波位相を用いた干渉測位を行う必要がある。また、別のアプローチとして、Crescent OEM Board での D-GPS による位置計測の他に加速度センサやジャイロセンサを併用して慣性航法により位置を補正する方法なども検討し、本研究の目的である陸上競技者リアルタイム計測システムに十分適用可能な位置計測デバイスを開発する予定である。

参考文献

- 1) 長谷川 邦洋, 斎藤 英雄: ハンドヘルドカメラを用いた陸上競技選手の接地位置計測に基づく速度・ストライド測定, 動画像処理実利用ワークショップ, DIA2009, 215/220 (2009)
- 2) 櫻田 淳也, 水浦 彩子: ピッチとストライドに着目した 100m 走の指導法に関する一考察 - レーザー式速度測定器 (LAVEG SPORT LDM 300C) を使用して -, 東京女子体育大学紀要, 第 39 号 43/46 (2004)
- 3) EquiPILOT, JRA 競争馬総合研究所 <http://www.eqinst.go.jp/JP/topics/equipilot.html> Access:2009/11/19
- 4) 搬送波位相測定値による精密測位の理論及び解析処理 http://gpspp.sakura.ne.jp/tutorial/html/gps_symp_2005_2.htm Access:2009/11/19
- 5) 坂井丈泰: GPS 技術入門, 17/41, 東京電機大学出版局 (2003)